

**Cours et exercices LES TRANSFORMATEURS**

L'intitulé de la leçon	LES TRANSFORMATEURS
<b>Le résumé de la leçon</b>	<p>Cette leçon est consacrée aux transformateurs (dits machines statiques). La fonction assurée par le transformateur et sa position dans la chaîne de transport et distribution de l'énergie électrique est rappelée. L'étude de son fonctionnement est effectuée en partant de la bobine à noyau de fer, en passant par le transformateur idéal et en aboutissant au transformateur monophasé et triphasé réel.</p> <p>En fonctionnement à vide, ce dernier est équivalent à une bobine à noyau de fer.</p> <p>Les phénomènes physiques mis en relief dans la bobine à noyau de fer et leur modélisation ont permis une introduction simple du transformateur monophasé. Cette introduction est suivie par l'analyse du fonctionnement du transformateur monophasé idéalisé (sans fuites et sans pertes).</p> <p>La correction du modèle établi par l'ajout des imperfections du modèle réel (les pertes et les fuites) ont permis une modélisation aisée du transformateur réel. Le modèle établi traduit à la fois les équations électriques et magnétiques de fonctionnement en plus du bilan énergétique.</p> <p>Des modèles simplifiés basés sur l'hypothèse de Kapp permettent une formulation explicite de la chute de tension et du rendement du transformateur. La détermination des paramètres du schéma équivalent reposant sur des essais classiques a été présentée.</p> <p>Pour avoir des critères « d'appréciation » des différents paramètres du transformateur, ces derniers sont alors exprimés en grandeurs relatives (%).</p> <p>Après la maîtrise du fonctionnement et la modélisation du transformateur monophasé, ce cours propose de reprendre la même démarche avec les transformateurs triphasés. La spécificité de ces transformateurs introduite par l'indice horaire et son impact sur leur mise en parallèle a été détaillée.</p> <p>La modélisation du transformateur triphasé a été présentée avec un modèle monophasé du type transformateur colonne ou transformateur de Thevenin. Ceci permet d'appliquer aisément les différentes connaissances du transformateur monophasé.</p> <p>Les transformateurs dits « spéciaux » constituent la troisième étape de ce cours. L'étude a concerné les transformateurs de courant, de tension (ou de potentiel) en plus des autotransformateurs et des transformateurs changeant le nombre de phases.</p> <p>Certains aspects technologiques liés aux transformateurs</p>

	régulateurs de tension, en plus des différents modes de refroidissement des transformateurs sont présentés à la fin de ce cours.
<b>La durée estimée du travail</b>	7 séances
<b>La date de la dernière mise à jour</b>	Novembre 2010
<b>Les pré-requis nécessaires</b>	Les circuits électriques : en continu, en alternatif monophasé et triphasé. Les matériaux en électrotechnique. Introduction à la conversion électromécanique.
<b>Les objectifs</b>	A la fin de ce chapitre, l'étudiant doit : <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Connaître la constitution du transformateur monophasé</li> <li>➤ Modéliser le transformateur par circuit équivalent et en déduire la chute de tension et le rendement</li> <li>➤ Pouvoir évaluer les paramètres du schéma équivalent (en %) à partir des essais classiques.</li> <li>➤ Trouver l'indice horaire d'un transformateur triphasé et faire sa mise en parallèle avec d'autres.</li> <li>➤ Etablir le schéma équivalent monophasé et étudier la marche en parallèle de plusieurs transformateurs triphasés ou monophasés.</li> <li>➤ Maîtriser le fonctionnement des transformateurs de mesure (de courant et de tension) et leur utilisation.</li> <li>➤ Modéliser l'autotransformateur et connaître ses applications.</li> <li>➤ Proposer des transformateurs pour le changement de nombres de phases (triphasé-diphasé, triphasé-hexaphasé)</li> <li>➤ Connaître les modes de réglage de tension (variation du rapport de transformation en charge et à vide) en plus des principaux modes de refroidissement des transformateurs.</li> </ul>
<b>Les conseils généraux des méthodes d'apprentissage</b>	

### Activités d'apprentissage :

#### Q1 :

La tension à la sortie d'un alternateur est de 3 kV.

Le transport est effectué à la tension 150 kV.

Donner le rapport de transformation et le type du transformateur T1 effectuant cette fonction.

A la fin du réseau de transport, la tension est abaissée à 30 kV.

Donner les caractéristiques du transformateur T2 réalisant cette tâche ?

La distribution est faite sous la tension 230 V après utilisation d'un transformateur T3.

Même question pour T3.

**R1 :**

<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
Elévateur	Abaisseur	Abaisseur
$m = V_2/V_1 = 50$	$m = V_2/V_1 = 0.2$	$m = V_2/V_1 = 0.00767$

**Q2 :**

Donner la dénomination des tensions alternatives suivantes : 3 kV ; 150 kV ; 30 kV et 230 V.

**R2 :**

HTA : 3 kV ; 30 kV

HTB : 150 kV

BTA : 230 V

Dénomination	Courant alternatif	Courant continu
Haute-Tension B (HTB)	> 50 kV	> 75 kV
Haute-Tension A (HTA)	1000 V – 50 kV	1500 V – 75 kV
Basse-Tension B (BTB)	500 – 1000 V	750 – 1500 V
Basse-Tension A (BTA)	50 – 500 V	120 – 750 V
Très Basse-Tension (TBT)	< 50 V	< 120 V

**Q3 :**

Le transformateur monophasé peut être considéré comme une bobine à noyau de fer. Justifier.

Une bobine à noyau de fer de résistance négligeable, absorbe sous la tension 100V/50 Hz :

- Une puissance active  $P_o = 50W$ ,
- Un courant magnétisant  $I_o = 1A$ .

L'induction maximale dans le fer  $B_m = 0.6 T$ .

1°) a) Que représente  $P_o$  ?

b) Calculer le flux maximum totalisé par la bobine. En déduire la section de la bobine si le nombre de spires  $n = 100$ .

2°) donner le diagramme vectoriel et les composantes actives  $I_{oa}$  et réactives  $I_{or}$  du courant magnétisant.

3°) On alimente la bobine par une tension 200V/50Hz.

On demande :

- a) La nouvelle induction  $B_m'$  dans le fer et la nouvelle puissance active  $P_o'$  absorbée
- b) Que deviennent les composantes actives et réactives ? en déduire le nouveau courant magnétisant  $I_o'$  ?
- c) Comment faut-il changer le nombre de spires pour maintenir  $B_m=0.6$  T ?

**R3 :**

En monophasé, si le transformateur est à vide, le secondaire ne joue aucun rôle et n'influence pas le fonctionnement de l'enroulement alimenté. Celui-ci étant enroulé sur un circuit ferromagnétique, définit bien une bobine à noyau de fer.

1)

- a) La puissance active absorbée est consommée sous forme de pertes (puisque le système ne fournit aucune puissance à l'extérieur).

Puisque la résistance de l'enroulement est négligeable,  $P_o$  constitue les pertes ferromagnétiques (pertes fer = pertes par courant de Foucault et pertes par hystérésis).

- b) L'équation de fonctionnement est :

$$\bar{V}_m = jn \omega \bar{\phi}_m \quad (1)$$

or, le flux totalisé  $\Psi = n\Phi \Rightarrow$

$$\Psi_m = \frac{V_m}{\omega} = 0.318 \text{ Wb}$$

L'équation (1) donne :

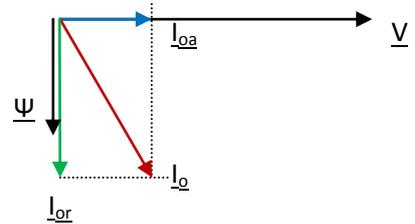
$$V = n \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = n \cdot 2\pi \cdot f \frac{B_m S}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow S = \frac{\sqrt{2}V}{n B_m 2\pi f} = 75 \text{ cm}^2$$

2)

$$P_o = V I_o \cos \varphi = V I_{oa} \Rightarrow I_{oa} = \frac{P_o}{V} = 0.5 \text{ A}$$

$$I_{or} = \sqrt{I_o^2 - I_{oa}^2} = 0.865 \text{ A}$$



3)

- a) Selon la formule de Boucherot, à fréquence constante, l'induction maximale est proportionnelle à la tension d'alimentation. Donc l'induction maximale passe à la valeur 1.2 T.

Les pertes fer, à fréquence constante sont proportionnelles à  $(B_m)^2$  ou  $(V)^2$ .

D'où  $P_o' = 4 P_o = 200 \text{ W}$ .

$$\Rightarrow I'_{oa} = \frac{P_o'}{V'} = 1 \text{ A} ;$$

Le courant réactif, selon le diagramme vectoriel et la relation d'Hopkinson, et en absence de saturation, est proportionnel au flux canalisé par le fer :

$$n I_{0r}' = R\phi \Rightarrow I_{0r}' \sim \phi$$

Comme l'induction magnétique a doublé, le flux est alors doublé, ce qui engendre le doublage de  $I_{0r}'$  !

$$I_{0r}' = 2 I_{0r} = 1.73A$$

Le nouveau courant magnétisant  $I_o'$  devient :

$$I_o' = \sqrt{I_{0r}'^2 + I_{0a}'^2} = 2 A$$

Selon la relation de Boucherot on a :

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} n B_m S f \Rightarrow a.V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} (a.n) B_m S f$$

Si  $V$  est multipliée par la constante  $a$ , on doit multiplier le nombre de spire  $n$  par  $a$  pour ne pas changer la valeur de l'induction  $B_m$ . la tension a été doublée ( $a = 2$ ), il faut donc doubler le nombre de spire qui doit passer à 200 spires.

---

#### Q4 :

Compléter les tableaux suivants correspondants à des transformateurs monophasés parfaits (sans pertes et sans fuites  $I_o = 0$ ).

Tableau 1

$N_1$	$N_2$	$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_2$
150	450	5000		210	
1200		30000		50	200
	200	110	220	40	
1000	15	220			100

Tableau 2

$U_2$	$I_2$	$\cos\varphi_2$	$S_2$	$P_2$
5000	4	0.8		
220			5500	4950
	25	0.7		3500
24		0.9	480	

**R4 :**

Pour le tableau 1, on utilisera les relations suivantes :

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Tableau 1

$N_1$	$N_2$	$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_2$
150	450	5000	15000	210	70
1200	300	30000	7500	50	200
100	200	110	220	40	20
1500	15	2200	22	1	100

Pour le tableau 2, on utilisera les relations suivantes :

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 = S_2 \cos\varphi_2; \quad S_2 = U_2 I_2$$

Tableau 2

$U_2$	$I_2$	$\cos\varphi_2$	$S_2$	$P_2$
5000	4	0.8	20000	16000
220	25	0.9	5500	4950
200	25	0.7	5000	3500
24	20	0.9	480	4320

**Q5 :**

Dans un essai à vide (sous tension nominale), on a mesuré :  $U_1 = 1500 \text{ V}$  ;  $I_o = 4 \text{ A}$  ;  $P_o = 1 \text{ kW}$ .

Calculer les pertes fer et le facteur de puissance  $\cos\phi_o$  du transformateur à vide.

**R5 :**

$$P_{fer} \approx P_o = 1000 \text{ W}$$

$$\cos\phi_o = \frac{P_o}{S_o} = \frac{P_o}{U_1 I_o} = \frac{1000}{4 \cdot 1500} = 0.167$$


---

**Q6 :**

A vide  $U_{20} = 220 \text{ V}$  ; en charge  $U_2 = 210 \text{ V}$ .

Calculer les chutes de tension absolue et relative du transformateur.

**R6 :**

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = 10 \text{ V.}$$

Encore, on a :  $\Delta U\% = 100 \cdot \Delta U / U_{20} = 100 \cdot 10 / 220 = 4.55$

---

**Q7 :**

Calculer le rendement d'un transformateur pour :

$$P_2 = 24 \text{ kW} ; P_o = 400 \text{ W} ; p_{jn} = 600 \text{ W.}$$

**R7 :**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos\phi_2}{U_2 I_2 \cos\phi_2 + \sum \text{pertes}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_o + p_{jn}} = \frac{1}{1 + \frac{P_o + p_{jn}}{P_2}} = \frac{1}{1 + \frac{400 + 600}{24000}} = 0.958$$


---

**Q8 :**

Dans un essai de court-circuit standard d'un transformateur 60 kVA, on a mesuré :

$$U_{1CC} = 50 \text{ V} ; I_{1CC} = I_{1n} = 60 \text{ A} ; P_{1CCn} = 1200 \text{ W.}$$

- 1) Que représente  $P_{1CCn}$  ? En déduire la résistance  $R_s$  % du schéma équivalent (ramenée au secondaire).
- 2) Calculer l'impédance de court-circuit  $Z_{ccp}$  ramenée au primaire.

**R8 :**

Dans l'essai standard, on règle la tension de court-circuit  $U_{cc}$  de façon à faire passer le courant nominal dans les deux enroulements.

Comme la tension de court-circuit  $U_{cc}$  d'alimentation est nominale, on a alors le courant nominal au primaire et au secondaire. En négligeant les pertes fer (tension  $U_{cc}$  réduite et faible), la puissance active absorbée est dépensée sous forme de pertes Joule dans les deux enroulements.

On en déduit :

$$p_{jn} = (r_1+r_2/m^2)I_{1n}^2 = (r_2+r_1*m^2)I_{2n}^2 = P_{1ccn}$$

D'autre part, on sait que :

$$P_{jn}\% = R_s\% = R_p\% = 100 * P_{jn} (W)/S_n (W) = 100*1200/(60 \cdot 10^3) = 2$$

2- l'impédance de court-circuit  $Z_{ccp} = U_{1cc}/I_{1cc} = 50/60 = 0,833 \Omega$ .

**Q9 :**

Le schéma équivalent d'un transformateur monophasé 10 kVA-1500V/220V – 50Hz est donné par la figure 1 où :

$$V_1 = 1500 \text{ V}; R_s = 0.2 \Omega; X_s = 0.2 \Omega;$$

$$R_f = 11250 \Omega; X_\mu = 1900 \Omega;$$

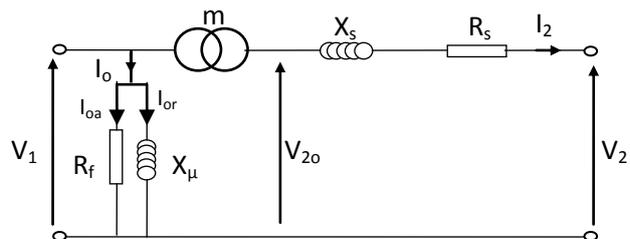


Fig. 1. Schéma équivalent du transformateur

1°- a- Calculer les pertes à vide  $P_o$ . Que représentent-elles?

b- Calculer le courant magnétisant  $I_o$  et la puissance apparente absorbée à vide. En déduire le facteur de puissance à vide ( $\cos\phi_o$ ) du transformateur.

2°- Alimenté sous sa tension nominale, le transformateur est soumis à un court-circuit brusque au niveau de son secondaire. Comparer le courant de court circuit  $I_{2cc}$  avec le courant nominal  $I_{2n}$ . Conclure.

**R9 :**

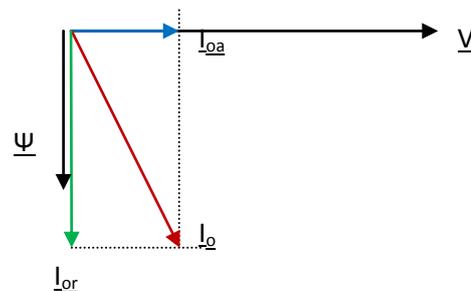
1) a-  $P_o = p_{Fer} = \frac{V_1^2}{R_f} = 200 \text{ W}$  (Les pertes fer)

b-  $\bar{I}_o = \bar{I}_{oa} + \bar{I}_{or}$

avec :  $I_{oa} = \frac{V_1}{R_f} = 0.133 \text{ A}; I_{or} = \frac{V_1}{X_\mu} = 0.79 \text{ A}$

$$I_o = \sqrt{I_{or}^2 + I_{oa}^2} = 0.8 \text{ A}$$

$$S_o = V_1 I_o = 1200 \text{ VA}$$



$$\cos\varphi_0 = \frac{P_o}{S_o} = 0.167$$

$$I_{2cc} = \frac{mV_1}{Z_s} = \frac{V_{2o}}{\sqrt{X_s^2 + R_s^2}} = \frac{220}{\sqrt{2}X_s} = 778 \text{ A}$$

Le courant nominal :

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2o}} = 45.45 \text{ A}$$

$$\Rightarrow \frac{I_{2cc}}{I_{2n}} = 17.1 \quad !!!$$

Le courant est très fort et inadmissible par les enroulements du transformateur. Il faut donc protéger le transformateur contre ce type de court-circuit !

---

### Q10 :

Les essais effectués sur un transformateur monophasé de puissance ont donné :

- A vide  $U_{2o} = 220 \text{ V}$  ;
- En charge, avec le courant nominal  $I_{2n} = 10 \text{ A}$ , la chute de tension relative est :  
 $\Delta U = 2.32 \%$  pour  $\cos\varphi_2 = 1$  ;       $\Delta U = 5 \%$  pour  $\cos\varphi_2 = 0.8 \text{ (AR)}$ .

- 1) Donner la tension aux bornes de la charge pour les deux types de charge.
- 2) Déduire de ces données l'impédance de court-circuit ( $R_s + jX_s$ ) du transformateur ramenée au secondaire et exprimée en %.
- 3)
  - a. Donner les caractéristiques de la charge qui ne provoque aucune chute de tension ( $\Delta U = 0$ ).  
 En déduire la puissance active et la puissance réactive de cette charge.  
 Cette charge est constituée par une résistance  $R_{ch}$  en parallèle à une réactance  $X_{ch}$ . Donner les valeurs de  $R_{ch}$  et  $X_{ch}$ .
  - b. Donner les caractéristiques de la charge qui provoque la chute de tension maximale ( $\Delta U_{max}$ ) pour le courant nominal. Evaluer pour ce cas la tension  $U_2$ .
- 4) On désigne par :
  - les pertes Joule nominale  $p_{jn} = R_s I_n^2$  ;
  - la puissance apparente du transformateur  $S_n = U_{2o} I_{2n}$
  - les pertes à vide  $P_o$ .
  - a. Montrer que :  $p_{jn} \% = 100 p_{jn}/S_n = R_s \%$
  - b. Montrer que :  $I_{2opt} \% = 100 \sqrt{\frac{P_o \%}{R_s \%}}$  où  $I_{2opt}$  désigne le courant optimum donnant le rendement maximal.

**R10 :**

1) La tension aux bornes de la charge :

$$\Delta U\% = 100 \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} = 100 - 100 \frac{U_2}{U_{20}} = 100 - U_2\%$$

$$U_2\% = 100 - \Delta U\% \Rightarrow U_2 = \frac{U_2\%}{100} U_{20}$$

Pour  $\cos\varphi_2 = 1$   $U_2 = 215 V$  ; Pour  $\cos\varphi_2 = 0.8$  AR  $U_2 = 209 V$

2) La chute de tension en % pour le cas:  $I_2 = I_{2n}$  (charge nominale) est :

$$\Delta U\% = R_s\% \cos \varphi_2 + X_s\% \sin \varphi_2$$

$$\cos \varphi_2 = 1 \Rightarrow \Delta U\% = R_s\% = 2.32$$

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \text{ AR} \Rightarrow \Delta U\% = R_s\% * 0.8 + X_s\% * 0.6 = 5$$

$$\Rightarrow X_s\% = 5.24$$

3)

a.  $\Delta U\% = 0 \Rightarrow \varphi_2 = -\text{Artg} \frac{R_s}{X_s} = -24^\circ$ , : Charge à  $\cos \varphi_2 = 0.91$  AV

$$P_2 = U_{20} I_{2n} \cos \varphi_2 = 2002 \text{ W}$$

$$Q_2 = U_{20} I_{2n} \sin \varphi_2 = -895 \text{ VAR}$$

$$R_{ch} = \frac{U_{20}^2}{P_2} = 24.2 \Omega ;$$

$$X_{ch} = \frac{U_{20}^2}{Q_2} = \frac{1}{c\omega} = 54,1 \Omega$$

b.  $\Delta U_{max} \Rightarrow \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_2} = 0 \Rightarrow \varphi_2 = \text{Artg} \frac{X_s}{R_s} = +66^\circ$  : Charge à  $\cos \varphi_2 = 0.407$  AR

$$\Delta U\% = R_s\% \cos \varphi_2 + X_s\% \sin \varphi_2 = 5.71$$

$$\Rightarrow U_2 = U_{20} \left( 1 - \frac{\Delta U\%}{100} \right) = 207 \text{ V}$$

4)

a.  $p_{jn} \% = 100 p_{jn} / S_n = 100 \frac{R_s I_{2n}^2}{U_{20} I_{2n}} = 100 \frac{R_s}{U_{20}} = R_s\%$

b.  $I_{2 \text{ opt}} = \sqrt{\frac{P_{Fer}}{R_s}} = \sqrt{\frac{P_o I_{2n}^2}{I_{2n}^2 R_s}}$

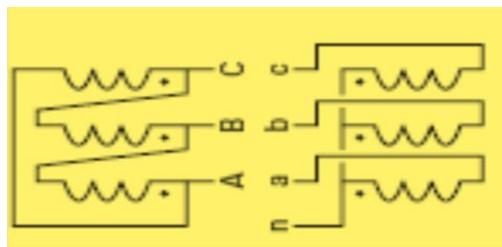
$$I_{2\ opt}\% = 100 \frac{I_{2\ opt}}{I_{2n}} = 100 \sqrt{\frac{P_o}{I_{2n}^2 R_s}} = 100 \sqrt{\frac{P_o/S_n}{(I_{2n}^2 R_s)/S_n}} = 100 \sqrt{\frac{P_o\%}{R_s\%}}$$

**Q11:**

- a) Donner l'indice horaire  $I_{h1}$  du transformateur T1 triphasé suivant.  
 b) Avec quels transformateurs peut-il être couplé en parallèle :  
 T2 ( $I_{h2} = 1$ ) ; T3 ( $I_{h3} = 9$ ) ; T4 ( $I_{h4} = 11$ ) .

Donner le schéma de couplage des plaques à bornes.

Donner le schéma de couplage des transformateurs D/d6 et D/y11

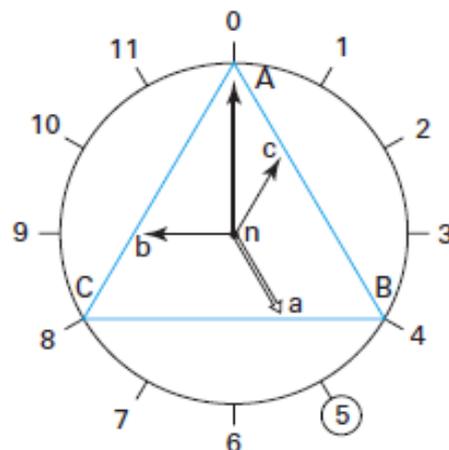


**R11 :**

Le diagramme vectoriel permet de déduire  $I_{h1} = 5$ .

Il ne peut être couplé qu'avec les transformateurs d'indice 1 ou 9 (différence multiple de 4 !).  
 Pour le couplage de T1 avec le transformateur T2 et T3, on fait la mise en parallèle comme pour les transformateurs T, T' et T'' d'indice horaire respectif 0 ( $T \equiv T2$ ), 4 ( $T' \equiv T1$ ) et 8 ( $T'' \equiv T9$ ).

On respecte l'ordre et la différence entre les indices horaires.



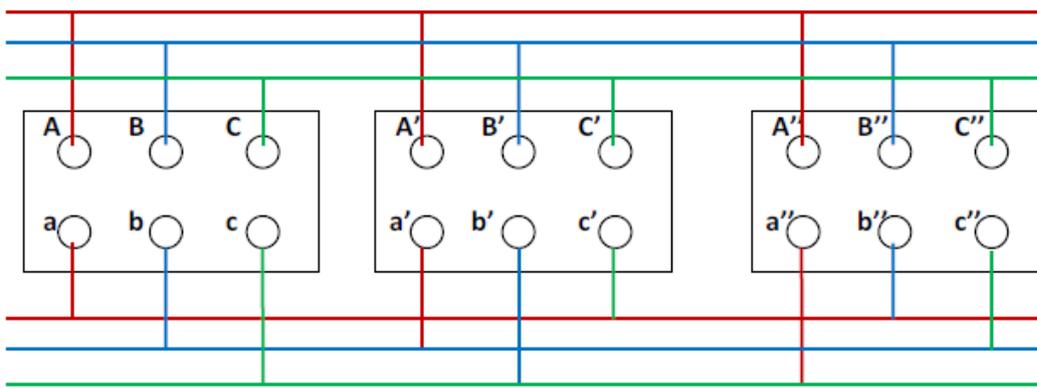
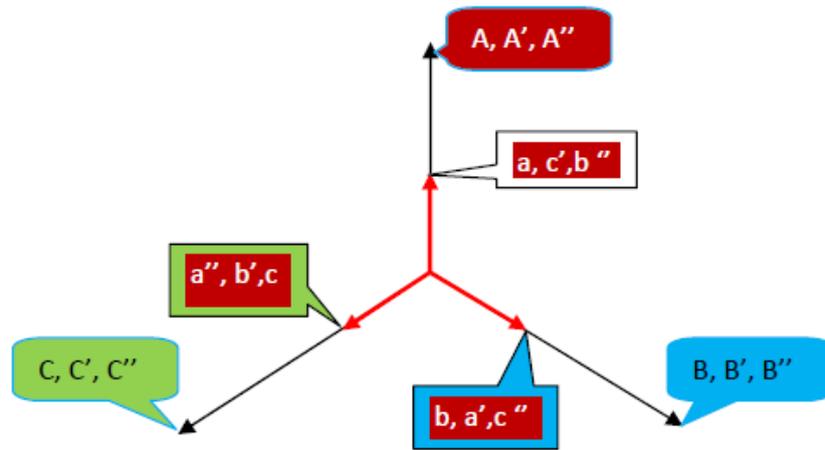
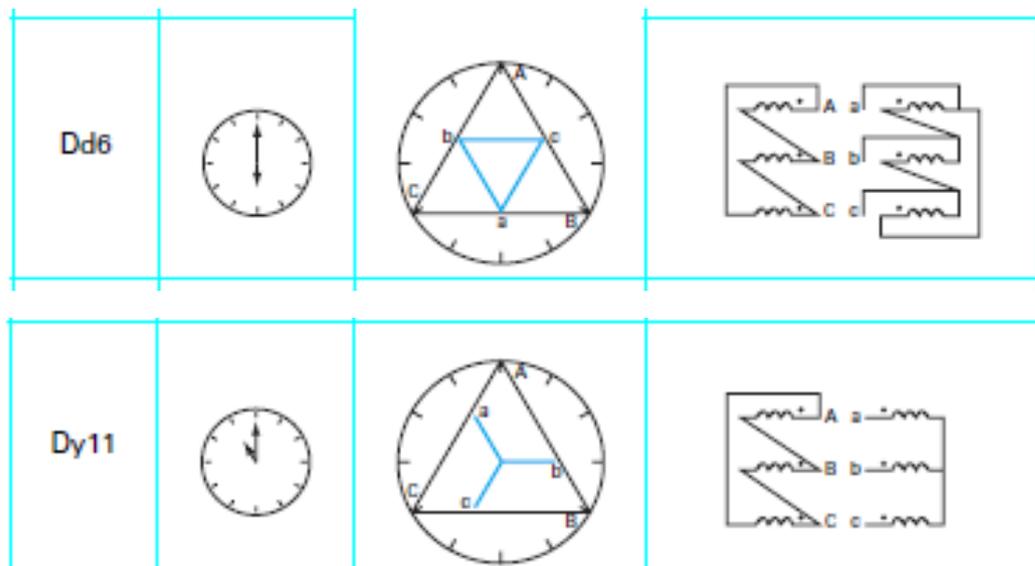


Fig. 49 schéma de couplage de 3 transformateurs d'indices horaires différents

$$lh_1=k ; lh_2=k+4 ; lh_3=k+8$$



**Q12 :**

Un transformateur D/yn a un rapport de nombres de spires  $m_c = N_2/N_1 = 0.044$ .

La tension primaire  $U_1 = 5 \text{ kV}$ .

- 1) Donner les tensions disponibles au secondaire
- 2) Le secondaire débite un courant de 100 A. Calculer le courant dans un enroulement primaire et le courant dans la ligne.

**R12 :**

- 1) La tension aux bornes d'un enroulement secondaire :

$$V_2 = m_c V_1$$

où  $V_1$  désigne la tension aux bornes d'un enroulement primaire.

Le couplage primaire étant D, alors on a :  $V_1 = U_1$ .

D'où :  $V_2 = 0.044 * 5000 = 220 \text{ V}$

Le secondaire étant couplé en étoile, on trouve entre phase la tension :

$$U_2 = \sqrt{3} V_2 = 380 \text{ V}$$

- 2) Entre les courants des enroulements on a la relation suivante :

$$J_1 = m_c J_2$$

Le courant dans l'enroulement primaire est donc :

$$J_1 = m_c * 100 = 4.4 \text{ A}$$

Le courant de ligne résultant d'enroulements couplés en D est :

$$I_L = \sqrt{3} * J_1 = 7.6 \text{ A}$$

**Q13 :**

Soit le transformateur triphasé :

D/y ; 600 kVA ; 660 V / 11 kV.

Les essais à vide et en court-circuit ont donné :

- essai à vide :

$$U_{1n} = 660 \text{ V}, \quad U_{20} = 11 \text{ kV}, \quad P_{10} = 4.8 \text{ kW}, \quad I_{10} = 16 \text{ A}.$$

- essai en court-circuit:

$$U_{1cc} = 50 \text{ V}, \quad I_{2cc} = 30 \text{ A}, \quad P_{1cc} = 8.2 \text{ kW}.$$

1°- Déterminer les paramètres  $m$ ,  $R_f$ ,  $X_\mu$ ,  $R_s$ ,  $X_s$  du dipôle de Thévenin correspondant.

Exprimer  $R_s$  et  $X_s$  en %.

2°- Donner la tension aux bornes d'une charge absorbant le courant nominal  $I_{2n}$  avec un  $\cos\varphi_2 = 0.8$  AR (on utilise dans cette question la formule de la chute de tension exprimée en %).

3°- Calculer le rendement correspondant à la charge précédente. La puissance active  $P_2$  consommée par cette charge est exprimée par :  $P_2 = \sqrt{3} U_2 I_{2n} \cos\varphi_2 \approx S_n \cos\varphi_2$ .

**R13)**

- 1)

- $m = \frac{V_{ao}}{V_A} = \frac{\frac{U_{2o}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{1N}}{\sqrt{3}}} = \frac{U_{2o}}{U_{1N}} = 16.67$
- $R_f = \frac{V_A^2}{P_o/3} = \frac{U_{1n}^2}{P_o} = 90.75 \text{ k}\Omega$  ;
- $X_\mu = \frac{V_A^2}{Q_o/3} = \frac{U_{1n}^2}{Q_o} = \frac{U_{1n}^2}{\sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2}} = \frac{U_{1n}^2}{\sqrt{3 U_{1n}^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}} = 24.67 \text{ k}\Omega$
- $R_s = \frac{\frac{P_{1cc}}{3}}{I_{acc}^2} = \frac{P_{1cc}}{3 I_{2cc}^2} = 3.04 \Omega$
- $Z_s = \frac{m V_{Acc}}{I_{acc}} = \frac{m U_{1cc}}{\sqrt{3} I_{2cc}} = 16 \Omega$
- $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = 15.7 \Omega$
- $Z_{bs} = \frac{U_{2o}^2}{S_n} = 201.6 \Omega$  ;  $Z_{bp} = \frac{U_{1n}^2}{S_n} = \frac{Z_{bs}}{m^2} = 0.725 \Omega$
- $R_s \% = 100 \frac{R_s(\Omega)}{Z_{bs}(\Omega)} = \frac{R_s I_{2n}}{U_{2o}} = 1.5$
- $X_s \% = 100 \frac{X_s(\Omega)}{Z_{bs}(\Omega)} = 7.78$

2)

- $\Delta U \% = 100 \frac{\Delta U}{U_{2o}} = \frac{I_2}{I_{2n}} [R_s \% \cos \varphi_2 + X_s \% \sin \varphi_2]$
- $\Delta U \% = R_s \% * 0.8 + X_s \% * 0.6 = 5.87 \Rightarrow$

$$U_2 = (1 - 0.0587) * U_{2o} = 10.35 \text{ kV}$$

3)

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_o + p_{jn}}{P_2}} = \frac{1}{1 + \frac{4.8 + 0.015 * S_n}{S_n \cos \varphi_2}} = 0.972$$

(On utilise la relation  $p_{jn} \% = R_s \%$ )**Q14 :**

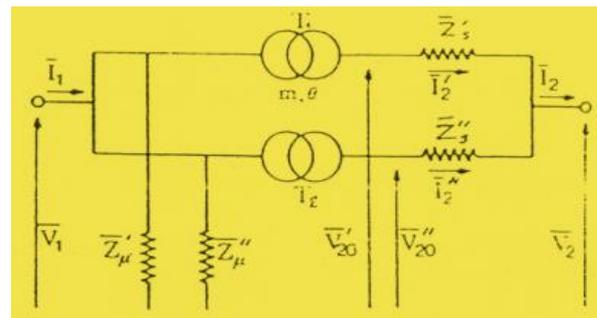
La figure ci-contre représente les dipôles de Thévenin par phase de deux transformateurs triphasés T' et T'' de même puissance (250 kVA) et de même couplage Y/yn.

T' et T'' sont couplés en parallèle et alimentés par la tension primaire  $U_{1n} = 20 \text{ kV}$ . Les paramètres respectifs de T' et T'' sont :

$$m' = m'' = 0.02 ;$$

$$\bar{Z}'_s = (10 + j20) \text{ m}\Omega ; \bar{Z}''_s = (15 + j30) \text{ m}\Omega ;$$

Les deux transformateurs alimentent une charge à  $\cos \varphi = 0.8 \text{ AR}$ .



- 1) Calculer  $I_2'$  maximum que peut débiter  $T''$  lorsque  $T'$  débite son courant nominal  $I_{2n}=360$  A.  
Conclure.
- 2) Tracer les triangles de Kapp relatifs à ce fonctionnement. En déduire le courant maximum  $I_{chmax}$  que débite l'ensemble des deux transformateurs sans surcharger aucun d'eux.
- 3) En déduire les paramètres du transformateur équivalent  $m$ ,  $R_{seq}$  et  $X_{seq}$ .
- 4) Evaluer alors la tension composée aux bornes de la charge pour le courant  $I_{chmax}$ .

**R14)**

- 1) Les deux transformateurs doivent débiter des courants inférieurs ou égaux à leur courant nominal (360 A).

De plus, les  $I_2'$  et  $I_2''$  obéissent à la relation :

$$\bar{Z}'_s \bar{I}'_2 = \bar{Z}''_s \bar{I}''_2$$

avec :

- $Z_s' = 22.36$  mΩ et  $Z_s'' = 33.54$  mΩ
- Les arguments  $\Psi' = \Psi'' = 63.4^\circ$

Les courants seront donc en phase avec  $I_2' > I_2''$  !

Il faut donc fixer  $I_2'$  et calculer par la suite  $I_2''$ .

$$\bar{I}''_2 = \frac{\bar{Z}'_s}{\bar{Z}''_s} \bar{I}'_2 = 240 \text{ A}$$

quand  $\bar{I}'_2 = 360 \text{ A}$        $\blacktriangleright$       donc       $\bar{I}''_2 \leq 240 \text{ A}$

- 2) On doit traduire vectoriellement les 2 égalités :

$$\begin{aligned} \bar{Z}'_s \bar{I}'_2 &= \bar{Z}''_s \bar{I}''_2 = \bar{Z}_{seq} \bar{I}_{ch} \\ \bar{I}_{ch} &= \bar{I}'_2 + \bar{I}''_2 \end{aligned}$$

Le diagramme vectoriel tracé à l'échelle (1 cm/V) donne :

$$OA = Z'_s I'_2 = Z''_s I''_2 = 8.05 \text{ V} \Rightarrow 8.05 \text{ cm}$$

$$|\bar{I}_{chmax}| = \bar{I}'_{2max} + \bar{I}''_{2max} = 360 + 240 = 600 \text{ A}$$



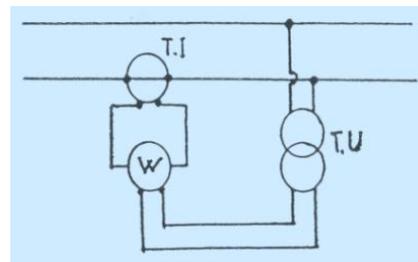
**Q16 :**

- 1) Un transformateur de courant TC ou TI présente un rapport 500. Il est Branché sur un ampèremètre 5 A. Donner le courant maximum qu'il peut mesurer ?
- 2) Quelle est l'avantage de la pince ampère-métrique montrée à la figure Q16a ?
- 3) Le TI peut il mesurer du courant continu ?
- 4) Dans le montage Fig.Q16b, le TI est branché au calibre 5 A du wattmètre alors que le TU de rapport 1/200 est branché sur le calibre 150 V du wattmètre. L'aiguille du wattmètre se stabilise sur la graduation 100 ; l'échelle totale étant de 150 graduations.

Donner la valeur de la puissance mesurée par le wattmètre.



a)



b)

Fig. Q16  
a) Pince ampère-métrique  
b) Montage pour mesure de la puissance avec TC et TP

**R16 :**

- 1) Pour le TI ou TC on a la relation des Ampère-tours :

$$I_2 = I_1/m$$

Avec  $I_2$  courant à la sortie du TC et  $I_1$  courant réel mesuré.

Pour notre cas, on a  $I_2 = 5 \text{ A}$  et  $m = 500$  ce qui donne  $I_1 = 2500 \text{ A}$  (2.5 kA).

- 2) La pince ampère-métrique permet la mesure du courant sans besoin d'ouvrir le circuit en question. Il est très pratique pour faire des mesures même sous tension (BT bien sur).
- 3) Seuls les TI basés sur l'effet hall peuvent mesurer à la fois du courant continu et du courant alternatif.
- 4) A pleine échelle, le wattmètre peut mesurer, en absence de TI et TU une puissance égale à P

$$P = V.I = 150 \cdot 5 = 750 \text{ W !}$$

Le TI de rapport 500 fait passer le calibre 5 A au calibre  $500 \cdot 5 = 2500 \text{ A}$ .

Le TU de rapport 1/200 permet de faire passer le calibre 150 V à la valeur  $200 \cdot 150 = 30 \text{ kV}$  !

Le nouveau calibre du wattmètre devient :

$$2500 * 30\ 000 = 75\ 10^6\ W = 75\ MW !$$

correspondant à la pleine échelle.

Pour la graduation 100, la règle de trois fournit :

$$P_{\text{mesurée}} = 100 * 75 / 150 = 50\ MW.$$